

生物炭对草甸黑土物理性质及雨后水分动态变化的影响

魏永霞^{1,2} 刘志凯¹ 冯鼎锐¹ 孙继鹏¹ 张雨凤¹

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探明生物炭对草甸黑土物理性质及雨后水分动态变化的影响,在大豆全生育期生长条件下,研究了东北黑土区草甸黑土5种生物炭添加量(0、25、50、75、100 t/hm²)下土壤物理性质(包括:土壤水分特征曲线、土壤含水率常数、土壤水分扩散率)和单次降雨土壤含水率变化特征,分析了生物炭对黑土区草甸黑土耕层土壤持水能力及雨后水分动态变化的影响。结果表明,施用生物炭能降低土壤残余含水率,增加土壤饱和含水率和田间持水量,其中对残余含水率的影响最显著,100 t/hm²生物炭处理使残余含水率最多降低27.6%;施用生物炭能明显降低土壤水分扩散率,随生物炭添加量的增加依次比对照组减少34.8%、37.5%、71.4%和58.9%;在单次降雨过程中,施用生物炭能减小土壤含水率的变化幅度,使土壤含水率在降雨之后更快地由迅速下降期进入缓慢下降期,并能明显提高缓慢下降期对应的土壤含水率;施用生物炭可以提高大豆产量,以75 t/hm²生物炭处理最高。研究结果可为黑土区农业水土资源高效利用与保护提供理论依据。

关键词: 生物炭; 草甸黑土; 土壤物理特性; 水分特征曲线; 水分扩散率; 土壤含水率

中图分类号: S156; S155.2⁺92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0201-07

Influences of Biochar on Physical Properties of Meadow Black Soil and Dynamic Changes of Soil Water after Individual Rainfall

Wei Yongxia^{1,2} Liu Zhikai¹ Feng Dingrui¹ Sun Jipeng¹ Zhang Yufeng¹

(1. College of Water Conservancy and Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: The effects of biochar which was made of crop straw on physical properties of meadow black soil and dynamic changes of soil water after individual rainfall were studied. The experiments were conducted by field pilots which were located at the sloping farm-land with three degrees of land slope gradient of Hongxing State Farm, Heilongjiang Province in 2015, and soybean, the main crop type of study area, was selected as experimental crop. Five levels of biochar were set, as 0 t/hm², 25 t/hm², 50 t/hm², 75 t/hm² and 100 t/hm² of biochar were put in the field pilots, which were represented by CK, C1, C2, C3 and C4, respectively. During the whole growth period of soybean, the soil physicochemical properties were investigated, including soil water characteristic curve, soil water diffusivity, soil bulk density, rate of soil porosity, organic matter content of soil, saturated soil water content, field water capacity and characteristics of soil water after individual rainfall. Soil water characteristic curve was measured by centrifuge, soil water diffusivity was tested by horizontal vitreous soil column, and soil water contents were measured by TDR field soil water measurement system in situ. The results showed that biochar could remarkably reduce soil bulk density and decrease soil water diffusivity of meadow black soil in the black soil area. The residual soil water content could be declined by 27.6% by treatment of C4. With the increase of biochar quantitative level, soil water diffusivities of C1, C2, C3

收稿日期: 2015-12-12 修回日期: 2016-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479033)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD12B01)和东北农业大学博士基金项目(2010RCB65)

作者简介: 魏永霞(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究,E-mail: wyx0915@163.com

and C4 were decreased by 34.8% , 37.5% , 71.4% and 58.9% , respectively. Additionally, it could give a rise to the saturated soil water content, field capacity and soybean yield, and the treatment with 75 t/hm² biochar got the highest yield. During an individual rainfall, with the use of biochar, the variation amplitude of soil water content tended to fall. This helped to accelerate the process of soil water content changing from rapid declining stage to slow declining stage, meanwhile, it increased the soil water content in the slow declining stage obviously. The research results can provide theoretical foundation for efficient utilization and protection of soil and water resources in agriculture in the black soil region.

Key words: biochar; meadow black soil; soil physical property; soil water characteristic curve; water diffusivity; soil water content

引言

生物炭(Biochar)是指生物有机质在无氧或缺氧条件下,经高温热裂解形成的固体产物,其碳含量高,比表面积大,吸附能力强,含有较多羟基和芳香基团^[1-2]。生物炭能有效降低土壤容重^[3],增加孔隙度和土壤有机质含量,并能显著改善土壤 pH 值^[4-5]。此外,生物炭可以增强作物碳氮吸收能力,抑制温室气体排放^[4],在土壤污染治理、大气碳汇等方面有巨大潜力。

生物炭在节水保肥、农业增产等方面同样具有独特优势,已有研究表明生物炭可以提高土壤持水保肥能力,并显著增加作物产量^[6-8]。MELO 等^[9]试验发现生物炭可以显著增加表层土的土壤毛管水,OUYANG 等^[10]发现生物炭可促进团聚体的形成并对土壤饱和导水率有轻微提高。田丹等^[11]的试验表明在砂土中施用生物炭可以提高土壤持水能力,并抑制水分的水平扩散。

目前的研究多集中于生物炭对土壤理化性质、水肥利用效率、污染物吸附、温室气体排放及作物生长的影响方面,有关生物炭对土壤水力参数和雨后水分动态变化影响的研究则较少。本文在草甸黑土中添加不同比例的生物炭,研究其对土壤基本理化性质、土壤水分特征曲线、土壤水分扩散率和单次降雨土壤含水率变化的影响,旨在为东北黑土区农业水土资源高效利用与保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选择位于东北典型黑土带上的黑龙江省农垦北安管理局红星农场(北纬 48°02′~48°17′,东经 126°47′~127°15′),该地区属寒温带大陆性季风气候,四季分明,全年平均降雨量 555.3 mm,且降雨多集中在 7—9 月。无霜期 110~115 d,年大于等于 10℃ 积温为 2 250.1℃,地下水埋深约为 40 m,最大冻深为 3.0 m^[12]。耕地多为丘陵漫岗,降雨集中且

历时较短,水土流失严重,旱涝灾害频发,大豆和玉米为该地区的主要粮食作物。

1.2 试验材料与设计

1.2.1 试验材料

试验地为坡耕地,坡度为 3°。供试土壤为草甸黑土,其基本性状为:砂粒(>0.02 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和粘粒(<0.002 mm),基本质量分数分别为 21.93%、44.21% 和 33.86%,有机质质量比约 86.3 g/kg,铵态氮质量比约 18.5 mg/kg,速效磷质量比约 58.5 mg/kg,速效钾质量比约 151 mg/kg,pH 值约为 6.3。供试生物炭为玉米秸秆生物炭,产自辽宁金和福农业开发有限公司,制备方式为无氧条件下 450℃ 高温裂解,粒径 1.5~2.0 mm,全碳 70.21%,全氮 1.58%,全磷 0.73%,全钾 1.66%(均为质量分数),pH 值为 9.36。供试大豆品种为黑河 3 号。

1.2.2 试验设备

试验设备主要有 CR-21G3 型高速冷冻离心机,脱水面 9.8 cm,用于室内测定土壤水分特征曲线。TRIME-T3 型管式土壤水分测量系统(TDR)用于野外测定土壤含水率。DIK-1130 型土壤三相仪用于测定土壤三相比等。自制水平玻璃土柱,用于测定土壤水分扩散率。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

田间试验面积为 30 m²(宽 5 m,长 6 m)。试验设置 5 个生物炭用量水平,即不加生物炭处理 CK 及生物炭添加量分别为 25(C1)、50(C2)、75(C3)、100 t/hm²(C4)处理,每个处理设置 3 次重复。

试验于 2015 年 5 月 16 日正式进行,对耕层土壤人工翻地(0~25 cm),将生物炭按添加量均匀混入后种植大豆,并于 2015 年 10 月 8 日收获。

1.3.2 试验方法与内容

2015 年 9 月底,用环刀采样器取原状土样(环刀体积为 100 cm³,环刀高度为 5 cm),取土深度为 10~15 cm。将环刀放入蒸馏水中浸泡吸水 48 h,直至土壤达到饱和状态后称量,饱和过程中水面低于

环刀上缘 1~2 mm。用离心机法测定土壤水分特征曲线,离心机转速依次设定为 500、1 000、1 500、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000 r/min,离心时间为 100 min^[13],每次离心结束后对土样连同环刀进行称量。每个处理重复 3 次。

在每个小区取土测定土壤水分扩散率,取土深度为 10~15 cm。土样经过风干、破碎和筛分^[11]后,按照野外实测干容重,以每层 3 cm 的高度装填土柱(土柱高 80 cm,直径 8 cm),并保证各层土壤接触良好。进水端采用马氏瓶供水,以保证土柱进水端含水率不变。试验开始后按 5 min 的时间间隔记录湿润锋的位置,当湿润锋推进到土柱高约 3/4 时停止供水,从湿润锋附近的取土孔迅速取土,测定土壤含水率。每个处理重复 3 次。

同时,在每个小区用环刀采样器取原状土样,使用 DIK-1130 型土壤三相仪测定总孔隙度,重铬酸钾—外加加热法测定土壤有机质含量。

在大豆播种后试验地降雨集中的 7—9 月之间持续观测降雨,观测到 2015 年 7 月 26 日 7:00—9:00 发生降雨,降雨量为 19 mm,且降雨之后—8 月 1 日无降雨。于 2015 年 7 月 26 日—8 月 1 日期间(大豆开花结荚期)用 TDR 测定各田间小区的土壤含水率,测量深度为 10~15 cm。

1.4 试验原理

1.4.1 土壤水分特征曲线

目前国内外学者大多采用 Van-Genuchten (VG)模型推求土壤水分特征曲线(SWCC)。Van-Genuchten 模型^[14]由 Van Genuchten 在 Mualem 理论^[15]的基础上于 1980 年提出,适用于描述低含水率时的土壤水分特征曲线。其表达式为

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^n)^m} & (h < 0) \\ \theta_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $m = 1 - 1/n \quad (n > 1)$

式中 θ_r ——土壤残余含水率,cm³/cm³

θ_s ——土壤饱和含水率,cm³/cm³

h ——压力水头,cm

α 、 n 、 m ——曲线拟合参数

1.4.2 土壤水分扩散率

测定土壤水分扩散率 $D(\theta)$ 应用最广泛的是 BRUCE 等^[16]在 1956 年提出的水平土柱入渗法,该法是在忽略重力的条件下,在土柱进水端维持一个接近饱和的稳定边界的土壤含水率,使水分在水平土柱中作水平吸渗运动。采用 Boltzmann 变换,假设 Boltzmann 变换参数 λ 与土壤含水率 θ 的关系是连续光滑曲线,对一维水平流动微分方程求解得到

$D(\theta)$ 的计算公式为

$$D(\theta) = -\frac{1}{2} \frac{d\theta}{d\lambda} \int_{\theta_a}^{\theta} \lambda d\theta \quad (2)$$

式中 $D(\theta)$ ——土壤水分扩散率,cm²/min
 θ ——土壤含水率,cm³/cm³
 λ ——Boltzmann 变换参数,cm·min^{1/2}

1.5 数据处理与分析

应用 Excel 对数据进行初步整理,用 Retc 软件进行土壤水分特征曲线的拟合,使用 Origin 8.0 进行数据处理和图表绘制,采用 SPSS 19.0 统计软件进行显著性分析,显著性水平为 0.05 和 0.01。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤理化性质的影响

不同处理的土壤理化性质如表 1 所示。与 CK 相比,随着生物炭施入量的增加,容重呈降低趋势,总孔隙度呈增加趋势,有机质含量增加极其显著。容重最高降低 7.21%,总孔隙度最高增加 6.4%,有机质含量最高增加 44.8%。这表明施用生物炭可以降低土壤容重,增加总孔隙度和有机质含量。这与已有的研究结果^[6,17]相一致。

表 1 不同处理的耕层土壤理化性质
Tab.1 Physical and chemical properties of tilth soil for different treatments

处理	容重/(g·cm ⁻³)	总孔隙度/(cm ³ ·cm ⁻³)	有机质质量比/(g·kg ⁻¹)
CK	1.138 ^a	49.6 ^a	86.4 ^a
C1	1.113 ^b	51.6 ^a	96.8 ^{ab}
C2	1.096 ^b	52.8 ^{ab}	109.3 ^{bc}
C3	1.090 ^b	53.4 ^{ab}	118.2 ^{cd}
C4	1.056 ^{bc}	56.0 ^b	125.1 ^d

注:a、b、c 代表 0.05 水平差异显著,下同。

2.2 生物炭对土壤水分特征曲线的影响

采用 Retc 软件对离心机法实测数据进行 Van-Genuchten 模型拟合,拟合参数见表 2,用 Origin 8.0 得到土壤水分特征拟合曲线(图 1)。

由图 1 实测数据可知,不同生物炭添加量均增加了耕层土壤的持水能力,随着生物炭含量的增加,各吸力对应的体积含水率呈增加趋势。相同吸力条件下,高生物炭施用量处理的体积含水率更高,土壤持水能力更强。这主要是由于生物炭的添加改变了土壤结构,减小了土壤容重并能增加土壤孔隙度^[9],使得土壤持水性能增强。

表 2 为土壤水分特征曲线的 Van-Genuchten 模型拟合参数。由表 2 可知,各处理 SWCC 的拟合优度 R^2 均大于 0.99, Van-Genuchten 模型对各生物炭处理均适用。此外,残余含水率、形状参数与生物

炭施用量分别呈负相关关系;饱和含水率、进气值倒数与生物炭施用量分别呈正相关关系。

表 2 土壤水分特征曲线的 VG 模型拟合参数

Tab.2 Fitted parameters of soil water characteristic curve from Van – Genuchten model

处理	残余含水率	饱和含水率	进气值倒数	形状参数 n	拟合优度 R^2
	$\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$			
CK	0.107 87 ^a	0.421 88 ^a	0.008 18 ^a	1.666 75 ^a	0.995 6 ^a
C1	0.107 12 ^a	0.435 91 ^a	0.009 18 ^a	1.614 91 ^a	0.997 2 ^{ab}
C2	0.082 00 ^{bc}	0.451 46 ^{ab}	0.011 66 ^{bc}	1.477 69 ^b	0.999 5 ^b
C3	0.080 61 ^{bc}	0.479 13 ^b	0.014 16 ^c	1.456 99 ^b	0.999 6 ^b
C4	0.073 13 ^c	0.486 06 ^{bc}	0.015 06 ^{cd}	1.413 72 ^{bc}	0.999 5 ^b

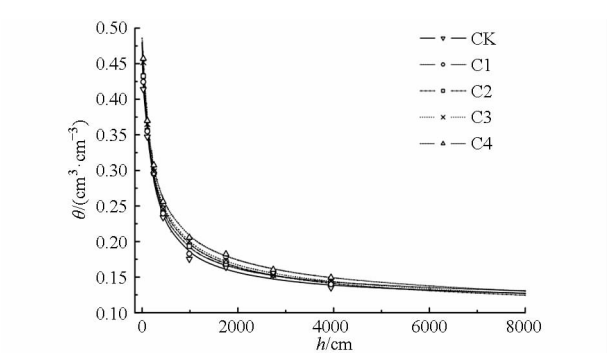


图 1 生物炭对土壤水分特征曲线的影响

Fig.1 Effect of biochar on soil water characteristic curve

当土壤吸力小于 500 cm,各处理 SWCC 非常陡峭而且曲线之间较密集,当土壤吸力介于 500 ~ 5 000 cm 时 SWCC 较稀疏。在 500 ~ 5 000 cm 吸力段,生物炭小区 SWCC 均位于对照小区上方,且随着生物炭含量的增加,有上移趋势。但当吸力大于 5 000 cm 时,生物炭小区 SWCC 有明显地加速下降的趋势,说明当吸力增大时,生物炭小区的土壤残余含水率 θ_r 减小,使得土壤中无效水含量减少。

2.3 生物炭对土壤水分常数的影响

表 3 为各处理实测残余含水率、饱和含水率和田间持水量。由表 3 可知,土壤残余含水率随生物炭含量的增加呈递减趋势,从大到小依次为 CK、C2、C1、C3、C4,各处理与对照组相比分别减少 15.3%、17.3%、20.4%、27.6%,这可能与进气值增大有关。由表 2 可见进气值倒数随生物炭含量的增加逐渐增加,即进气值逐渐减小,进气值越大,水越难从土体中排出^[18],因此残余含水率随生物炭含量的增加呈递减趋势。饱和含水率随生物炭含量的增加呈现递增趋势,C1、C2、C3、C4 依次较 CK 增加 2.61%、4.66%、6.44%、9.46%。各生物炭处理田间持水量较 CK 分别提高 3.41%、5.57%、7.12%、10.84%。这与总孔隙度的增加有密切关系,生物炭容重小,密度低,导致土壤密度降低,单位体积干物

质所占体积减小,使得饱和含水率增加。

表 3 生物炭对土壤含水率参数的影响

Tab.3 Effect of biochar on soil water parameters

处理	实测残余含水率	实测饱和含水率	实测田间持水量
CK	0.098 ^a	0.440 ^a	0.323 ^a
C1	0.081 ^b	0.452 ^{ab}	0.334 ^{ab}
C2	0.083 ^b	0.461 ^b	0.341 ^b
C3	0.078 ^{bc}	0.469 ^b	0.346 ^b
C4	0.071 ^c	0.482 ^{bc}	0.358 ^c

2.4 生物炭对土壤水分扩散率的影响

图 2 为各生物炭处理下土壤水分扩散率 $D(\theta)$ 随土壤体积含水率 θ 的变化曲线。

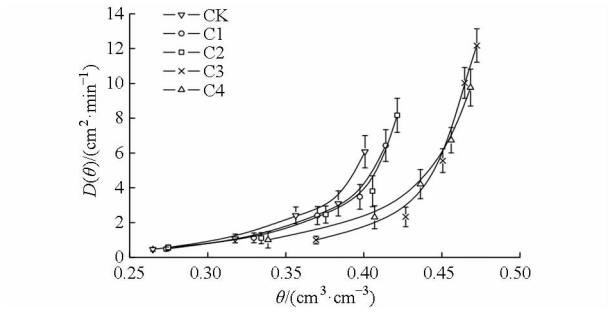


图 2 生物炭对土壤水分扩散率的影响

Fig.2 Effect of biochar on soil water diffusivity

由图 2 可知,随着生物炭含量的增加,土壤水分扩散率逐渐减小,C1、C2、C3 和 C4 依次较对照组 CK 减小 34.8%、37.5%、71.4% 和 58.9%。各生物炭处理的 $D(\theta) \sim \theta$ 曲线均位于对照小区下方,同一体积含水率条件下,土壤水分扩散率从大到小依次为:CK、C1、C2、C4、C3,这表明生物炭能抑制水分的水平扩散,增加土壤持水能力,这与田丹等^[11]的研究结果相一致。

由表 1 可知,施用生物炭能减小土壤容重并增加土壤孔隙度,土壤水分扩散率随之减小。这可能是由于玉米秸秆生物炭粒径较小(1.5 ~ 2 mm),有较大的比表面积^[19],生物炭施入土壤中的重要意义在于改善土壤结构,而土壤结构的改善又促进了土壤水分常数的改善,从而提高了土壤持水能力。

2.5 生物炭对单次降雨条件下耕层土壤含水率的影响

图 3 为各处理土壤含水率随时间变化的实测点折线图,降雨时间为 7 ~ 9 h,土壤含水率测定时间为自 0 开始,时间间隔分别为 7 h 和 17 h。

在单次降雨过程中,各处理土壤含水率在降雨前期(即快速上升期)均迅速上升,且对照组上升幅度最大,上升 9.74%,这可能与生物炭能提高土壤入渗能力有关。降雨之后土壤含水率迅速下降,对

照组下降幅度最大,下降 11.64%。由图 3 可知,在降雨之后 46 h 内,各生物炭处理土壤含水率曲线均在对照小区以下,在降雨后 46~80 h,对照组土壤含水率迅速下降。降雨 80 h 后,对照组的土壤含水率基本位于各生物炭处理之下。这可能是由于生物炭能提高土壤的非饱和导水率,促进水分下渗,从而降低土壤含水率的上升幅度。而当土壤含水率持续降低时,生物炭显著提高了土壤的持水能力,土壤含水率更快地由迅速下降期进入缓慢下降期。

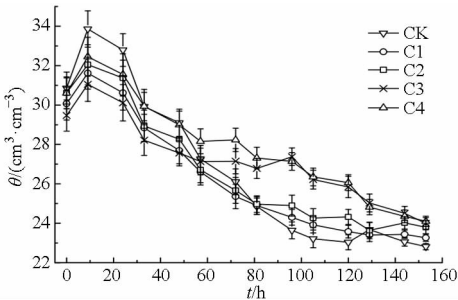


图 3 生物炭对土壤含水率随时间变化的影响
Fig.3 Effect of biochar on soil water content with time

表 4 为对各处理 14 个数据点的离散分析,C3 和 C4 的土壤含水率均值有所提高,各生物炭处理土壤含水率的极差和标准差明显降低,其中 C3 处理极差和标准差的降幅最大,分别降低了 36.14% 和 47.44%。结合图 3 可知,各生物炭处理都能减小雨后土壤含水率的变化幅度,使土壤含水率更快地在降雨之后进入缓慢下降期,并能明显提高其对应的土壤含水率。

表 4 土壤含水率的离散分析

Tab.4 Discrete analysis of soil water content			
处理	均值/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	极差	标准差
CK	26.73	11.04	3.90
C1	26.26	8.35	2.98
C2	26.68	8.41	3.00
C3	27.18	7.05	2.05
C4	27.86	8.35	2.63

2.6 生物炭对大豆产量及其构成要素的影响

生物炭对土壤物理性质及其对降雨响应影响的最终体现是作物生长,因此大豆产量及其构成要素是生物炭对土壤正面效应的有效证明。大豆单株荚数、单株粒数、百粒质量是大豆产量的主要构成要素,其中任一要素的变化都将直接影响大豆的产量。不同处理对大豆产量构成要素的影响结果如表 5 所示。各生物炭处理单株荚数、单株粒数、百粒质量均高于 CK 处理,其中 C3 处理尤为显著,3 个指标值分别比 CK 处理增加 31.14%、26.91% 和 16.31%。这表明生物炭添加量为 75 t/hm^2 的处理对大豆生长

最有利。

表 5 不同处理大豆产量构成要素

Tab.5 Soybean yield components of different treatments

处理	单株荚数	单株粒数	百粒质量/g
CK	34.81 ^a	85.85 ^a	18.52 ^a
C1	41.82 ^{bc}	99.26 ^{bc}	19.27 ^{ab}
C2	40.29 ^b	103.83 ^c	20.03 ^b
C3	45.65 ^{cd}	108.95 ^{cd}	21.54 ^{bc}
C4	42.96 ^c	104.38 ^c	20.47 ^b

图 4 为采用实收测产测定的各处理大豆产量,各生物炭处理产量均增加,产量由低到高依次为 CK、C1、C2、C4、C3,C1、C2、C3 和 C4 依次比 CK 处理产量增加 7.22%、13.91%、26.21% 和 16.57%。说明施用生物炭改善了土壤的物理性质,对大豆生长环境产生了正面效应,从而使得大豆产量有较大提高。

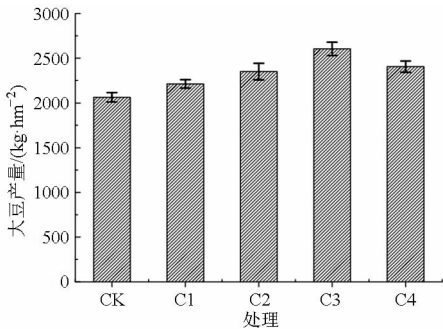


图 4 生物炭对大豆产量的影响
Fig.4 Effects of biochar on soybean yield

3 讨论

作为世界三大黑土带之一的东北黑土区对于保障中国粮食安全有重要作用,而当前针对东北黑土区施用生物炭的研究还极少。水分是限制东北黑土区农业生产的主要因素^[20],当前的研究极少有关于生物炭对雨后水分动态变化的影响,大多集中在生物炭对土壤理化性质和土壤改良的影响研究上^[4,21-22],且部分研究并没有在作物生长条件下进行。因此,本研究选择黑土区草甸黑土为研究对象,在作物生长过程中研究了生物炭对其物理性质及雨后水分动态变化的影响。

结果表明,在草甸黑土中施加生物炭能有效降低土壤容重,提高总孔隙度和有机质含量,这与 LAIRD 等^[23]和王红兰等^[24]的研究结果相一致。添加生物炭能提高土壤持水能力,在低吸力段其土壤水分特征曲线在对照小区之上,这与其他相关研究结果^[9,24]相吻合。同时,本研究发现,当吸力增大时,生物炭小区的土壤残余含水率 θ_r 减小,使得土壤中无效水含量减少,从而对作物生长起到一定的促进作用。田丹等^[11]的试验表明添加量为 0.05、

0.1、0.15 g/g 的秸秆木炭和花生壳炭均能有效减小土壤水分扩散率,这与本试验添加量为 25、50、75 t/hm² 的研究结果类似。本试验还得出:当生物炭添加量达到 100 t/hm² 时,生物炭对土壤水分扩散率的降低效果开始衰弱,生物炭添加量为 100 t/hm² 的小区大豆产量明显低于 75 t/hm² 的小区也从侧面证明了这一点;生物炭能减小雨后土壤含水率的变化幅度,使土壤含水率更快地在降雨之后进入缓慢下降期,并能明显提高其对应的土壤含水率。

实际生产和应用中,在全球高度关注碳排放的大背景下,基于低碳、减排等可持续发展的理念,研究秸秆生物炭在东北黑土区应用方面的有关问题,尤其是施加自身作物所产生生物炭的农业生产模式,对本区丰富的秸秆资源的绿色循环、高效利用具有重要意义。

4 结 论

(1)施用生物炭能显著降低黑土区草甸黑土的

土壤容重,增加土壤总孔隙度和有机质含量。其中容重最高降低 7.21%,总孔隙度最高增加 6.4%,有机质含量最高增加 44.8%。

(2)施用生物炭可显著降低黑土区草甸黑土的土壤残余含水率,最高可达 27.6%。施用生物炭能增加黑土区草甸黑土的土壤饱和含水率和田间持水量。

(3)施用生物炭能减小黑土区草甸黑土的土壤水分扩散率,生物炭添加量为 25、50、75、100 t/hm² 的处理依次比对照组减小 34.8%、37.5%、71.4%、58.9%。

(4)在单次降雨过程中,施用生物炭明显能减小土壤含水率的变化幅度,使土壤含水率更快地在降雨之后进入缓慢下降期,并能明显提高缓慢下降期对应的土壤含水率。

(5)在草甸黑土中施加秸秆生物炭,可以不同程度的提高大豆产量,其最佳用量为 75 t/hm²。

参 考 文 献

1 郑庆福,王永和,孙月光,等.不同物料和炭化方式制备生物炭结构性质的 FTIR 研究[J].光谱学与光谱分析,2014,34(4):962-966.
ZHENG Qingfu, WANG Yonghe, SUN Yueguang, et al. Study on structural properties of biochar under different materials and carbonized by FTIR[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(4): 962-966. (in Chinese)

2 何绪生,耿增超,余雕,等.生物炭生产与农用的意义及国内外动态[J].农业工程学报,2011,27(2):1-7.
HE Xusheng, GENG Zengchao, SHE Diao, et al. Implications of production and agricultural utilization of biochar and its international dynamic[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2): 1-7. (in Chinese)

3 MARCUS H, BRENT C, SALLY B, et al. Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? [J]. Plant and Soil, 2014, 376(1-2): 347-361.

4 秦晓波,李玉娥,WANG Hong,等.生物质炭添加对华南双季稻田碳排放强度的影响[J].农业工程学报,2015,31(5):226-233.
QIN Xiaobo, LI Yu'e, WANG Hong, et al. Impact of biochar amendment on carbon emissions intensity in double rice field in south China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(5): 226-233. (in Chinese)

5 ZWIETEN L V, KIMBER S, MORRIS S, et al. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility[J]. Plant and Soil, 2010, 327(1-2): 235-246.

6 KARHU K, MATILA T, BERGSTROM I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity-results from a short-term pilot field study[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 140(1-2): 309-313.

7 勾芒芒,屈忠义,杨晓,等.生物炭对砂壤土节水保肥及番茄产量的影响研究[J].农业机械学报,2014,45(1):137-142.
GOU Mangmang, QU Zhongyi, YANG Xiao, et al. Study on the effects of biochar on saving water, preserving fertility and tomato yield [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 137-142. (in Chinese)

8 GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: a review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 35(4): 219-230.

9 MELO C M T, HOLANDA N M A, MADARI B E, et al. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system[J]. Solid Earth, 2014, 5: 939-952.

10 OUYANG L, WANG F, TANG J, et al. Effects of biochar amendment on soil aggregates and hydraulic properties[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 13(4): 991-1002.

11 田丹,屈忠义,勾芒芒,等.生物炭对不同质地土壤水分扩散率的影响及机理分析[J].土壤通报,2013,44(6):1374-1378.
TIAN Dan, QU Zhongyi, GOU Mangmang, et al. Influence and mechanism analysis of biochar an water diffusivity of different soil textures[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(6): 1374-1378. (in Chinese)

12 杨爱峥,魏永霞,张忠学,等.坡耕地综合治理技术模式的蓄水保土及增产效应[J].农业工程学报,2011,27(11):222-226.
YANG Aizheng, WEI Yongxia, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of technology modes for sloping farm-land comprehensive control on soil water conservation and crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 222-226. (in Chinese)

13 尚慢廷,冯杰,刘佩贵,等. SWCC 测定时吸力计算公式与最佳离心时间的探讨[J]. 河海大学学报, 2009, 37(1): 12-15.

SHANG Manting,FENG Jie,LIU Peigui,et al. On formulas for soil suction and optimum centrifugal time by use of SWCC[J]. Journal of Hohai University,2009,37(1):12 – 15. (in Chinese)

14 VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44(5):892 – 898.

15 MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1975,12(3):513 – 522.

16 BRUCE R R,KLUTE A. The measurement of soil moisture diffusivity[J]. Soil Science Society of America Journal,1956,20(4): 458 – 462.

17 ATANU M,RATTAN L. Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions[J]. Agronomy,2013,3(2):313 – 339.

18 汪东林,栾茂田,杨庆. 重塑非饱和黏土的土-水特征曲线及其影响因素研究[J]. 岩土力学,2009,30(3):751 – 756.

WANG Donglin,LUAN Maotian,YANG Qing. Experimental study of soil-water characteristic curve of remolded unsaturated clay [J]. Rock and Soil Mechanics,2009,30(3):751 – 756. (in Chinese)

19 冯小江,伊松林,张齐生. 热解条件对农作物秸秆炭性能的影响[J]. 北京林业大学学报,2009,31(增刊):182 – 184.

FENG Xiaojiang,YI Songlin,ZHANG Qisheng. Effects of pyrolysis conditions on performance of crop stalk carbon[J]. Journal of Beijing Forestry University,2009,31(Supp.):182 – 184. (in Chinese)

20 邹文秀,韩晓增,江恒,等. 东北黑土区降水特征及其对土壤水分的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(9):196 – 202.

ZOU Wenxiu,HAN Xiaozeng,JIANG Heng,et al. Characteristics of precipitation in black soil region and response of soil moisture dynamics in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(9):196 – 202. (in Chinese)

21 候月卿,赵立欣,孟海波,等. 生物炭和腐植酸类对猪粪堆肥重金属的钝化效果[J]. 农业工程学报,2014,30(11):205 – 215.

HOU Yueqing,ZHAO Lixin,MENG Haibo,et al. Passivating effect of biochar and humic acid materials on heavy metals during composting of pig manure[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(11):205 – 215. (in Chinese)

22 朱继荣,韦绪好,祝鹏飞,等. 施用生物炭抑制塌陷区复垦土壤硝化作用[J]. 农业工程学报,2015,31(7):264 – 271.

ZHU Jirong,WEI Xuhao,ZHU Pengfei, et al. Biochar addition inhibiting nitrification of reclaimed soils in coal-mining subsidence area[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(7):264 – 271. (in Chinese)

23 LAIRD D A,FLEMING P,DAVIS D D,et al. Impact of biochar amendment on the quality of a typical midwestern agricultural soil [J]. Geoderma,2010,158(3 – 4):443 – 449.

24 王红兰,唐翔宇,张维,等. 施用生物炭对紫色土坡耕地根区土壤水力学性质的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(4):107 – 112.

WANG Honglan,TANG Xiangyu,ZHANG Wei,et al. Effects of biochar application on tillage soil hydraulic properties of slope cropland of purple soil[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(4):107 – 112. (in Chinese)

(上接第 154 页)

25 覃超,郑粉莉,徐锡蒙,等. 玉米秸秆缓冲带防治黄土坡面细沟侵蚀的效果[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 35 – 42.

QIN Chao,ZHENG Fenli,XU Ximeng,et al. Effects of maize straw buffer in preventing rill erosion on loess slope[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(1): 35 – 42. (in Chinese)

26 吴普特,周佩华,武春龙,等. 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 47 – 56.

WU Pute,ZHOU Peihua,WU Chunlong, et al. Research on the spatial distribution characteristics of slope rill erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1997, 4(2): 47 – 56. (in Chinese)

27 温磊磊,郑粉莉,沈海鸥,等. 沟头秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地沟蚀发育影响的试验研究[J]. 泥沙研究, 2014(6): 73 – 80.

WEN Leilei,ZHENG Fenli,SHEN Haiou, et al. Effects of corn straw mulch buffer in the gully head on gully erosion of sloping cropland in the black soil region of northeast China[J]. Journal of Sediment Research, 2014(6): 73 – 80. (in Chinese)

28 WELLS R R, BENNETT S J, ALONSO C V. Modulation of headcut soil erosion in rills due to upstream sediment loads[J]. Water Resources Research, 2010, 46(12): 1 – 16.

29 AN J, ZHENG F L, LU J, et al. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions[J]. Soil Science, 2012, 177(8): 517 – 526.

30 WELLS R R, MOMM H G, RIGBY J R, et al. An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows [J]. CATENA, 2013, 101: 114 – 121.